昆虫学报 *Acta Entomologica Sinica*, September 2009, 52(9): 974－983 ISSN 0454-6296

红火蚁自然种群耐寒性的研究

许益镌，陆永跃，黄　俊，曾　玲*，梁广文
（华南农业大学红火蚁研究中心/昆虫学系，广州 510642）

摘要：为综合评价红火蚁 *Solenopsis invicta* Buren 的抗寒能力，依据2005－2006年在深圳野外获得的红火蚁自然种群测定了其不同品级及虫态的过冷却点和低温处理后的存活率。研究结果表明：红火蚁各品级及其3个虫态的过冷却点之间存在显著差异。工蚁与雌、雄有翅蚁之间的过冷却点不存在差异，而雌、雄有翅蚁之间的过冷却点存在差异；不同虫态过冷却点大小依次为蛹＜成虫＜幼虫。红火蚁自然种群在越冬前后存在过冷却点波动的现象，表现为从10月份开始红火蚁野外种群的过冷却点开始逐渐下降，在2月份达到最低，为－12.68℃，3月份回升到－9.51℃。红火蚁低温下的存活率 $\hat{S}_T$ 与低温暴露温度 T 和暴露时间 t 之间的关系均符合逻辑斯谛曲线方程。当处理时间为0.5 h，红火蚁在－14℃时存活率为15.3%；当处理时间为1，2和4 h，工蚁在处理温度分别为－13，－9和－9℃才可全部致死。当处理温度为－10℃，需要经过240 min工蚁才全部死亡，在－11℃，则需要120 min。相同低温的不同变幅和持续作用对工蚁的存活有较大的影响。总体来说，经过相同的处理时间，低温变幅越大存活率越低，而且存活率降至0所需要的时间也不同，4±9℃处理时在经过9 d即降为0，而4±0℃处理则要长于15 d。与对照相比，4±6℃和4±9℃处理4 d能显著提高工蚁在低温下的存活率。结果提示，不同变幅的持续低温作用对红火蚁的抗寒能力有着驯化作用，红火蚁对极端气候有较强的适应能力。

关键词：红火蚁；自然种群；耐寒性；过冷却点；低温；驯化
中图分类号：Q968.1　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：0454-6296(2009)09-0974-10

Cold hardiness of natural populations of the red imported fire ant, *Solenopsis invicta* Buren (Hymenoptera: Formicidae) in Shenzhen, Guangdong

XU Yi-Juan, LU Yong-Yue, HUANG Jun, ZENG Ling*, LIANG Guang-Wen (Red Imported Fire Ant Research Centre/Entomology Department, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: To obtain a comprehensive evaluation of cold hardiness of the red imported fire ant, *Solenopsis invicta* Buren, the super cooling points (SCPs) of different casts at developmental stages and the ability of workers to survive at low temperature were measured based on materials collected from *S. invicta* natural populations of Shenzhen, Guangdong in 2005－2006. The results showed that there was a significant difference in SCPs between casts and three developmental stages while the SCPs of the larva, adult and pupa reduced successively. No significant difference was found between the workers and the winged ants in SCPs, but significant difference existed between male and female winged ants. SCPs fluctuated over winter, reduced from October and got to the bottom (－12.68℃) in February, and rose to －9.51℃ in March. The survivorship of workers ($\hat{S}_T$) showed a strong relationship with the exposure temperature (T) and the exposure time (t), fitting the Logistic equation. When the exposure time was 0.5 h, the survival rate of workers was 15.3% at －14℃. At the exposure time of 1, 2 and 4 h, the entire lethal temperatures for *S. invicta* were －13℃, －9℃ and －9℃, respectively. When the exposure temperature was －10℃, all workers died within 240 min; while at －11℃, it took only 120 min. Fluctuation and persistence of low-temperature were correlative with the survival rate of workers. Under more fluctuating low temperature, the workers had a higher mortality. It took 9 d for the survival rate to drop to 0 under the condition of 4±9℃, while it was longer than 15 d for that under 4±0℃. But the survivors grew stronger in cold tolerance.

基金项目：国家“973”计划项目(2009CB119200)；科技基础性工作专项(2006FY111000-1)；国家自然科学基金项目(305712427)；广东省科技计划项目(2007B020710014,2006A20301005)
作者简介：许益镌，男，1978年12月生，浙江温州人，博士，研究方向为入侵害虫生态学，E-mail：xuyijuan@scau.edu.cn
＊通讯作者 Author for correspondence，E-mail：zengling@scau.edu.cn
收稿日期 Received：2009-01-09；接受日期 Accepted：2009-06-16

Compared with the control, treatments under fluctuating temperature of 4 ± 6℃ and 4 ± 9℃ for 4 d could raise the survived workers' cold tolerance at low temperature significantly. The results suggest that the fire ant can obtain rapid acclimatization when exposed to low temperatures, and it has strong adaptability to extreme weather.

Key words: *Solenopsis invicta*; natural population; cold hardiness; super cooling point (SCP); low temperature; acclimatization

生物在与环境长期的相互作用过程中，形成一些具有生存意义的特征。依靠这些特征，生物能免受各种环境因素的不利影响和伤害，同时还能有效地从其生境获取所需的物质和能量，以确保个体发育的正常进行，自然界的这种现象被称为"生态适应"。入侵种往往能形成极具优势性的爆发与扩张，很大程度上取决于它强大的竞争以及对恶劣环境的适应能力。热耐受性(thermal tolerance)便是生物对环境适应的一种手段和结果，热适应性同时包括了生物对低温和高温胁迫的抵御和承受能力，也被用来揭示物种对极端温度胁迫的进化适应(Gibert *et al.*, 2001; Hoffmann *et al.*, 2003)。

红火蚁 *Solenopsis invicta* 的生态适应能力直接影响着其潜在的地理分布，高纬度地区的冬季低温是限制红火蚁向两极扩散的决定性因素，也是用于预测红火蚁潜在分布区的重要指标之一(Anonymous, 1972; Vinson, 1997; Korzukhin *et al.*, 2001; Morrison *et al.*, 2004)。在美国，红火蚁分布于年最低温度 -12.3℃以南区域，应用蚁群生长模型进行预测的结果表明红火蚁在年最低温度 -17.8℃以下的地区无法繁衍(Killion *et al.*, 1995; Morrison *et al.*, 2004)。红火蚁自身的生理条件以及环境因素是影响其耐寒性的两个方面，不同品级和虫态之间的耐寒性存在较大的差异，一般来说，成虫的过冷却点(super cooling point, SCP)要高于幼体阶段，而幼虫的过冷点则高于蛹(Francke *et al.*, 1986; Taber *et al.*, 1987; Diffie and Shepard, 1989)。不同的地理种群由于气候条件差异导致耐寒性不同，而气候的季节性变化也使红火蚁的过冷却点产生波动(James *et al.*, 2002; Quarles *et al.*, 2005)。个体大小对工蚁的耐寒性有较大的影响，大小工蚁之间的过冷却点大约相差 3℃(Hahn *et al.*, 2008)，而被微孢子虫感染后的红火蚁表现出更强的抗寒能力(Shannon *et al.*, 2002)。

研究红火蚁自然种群的耐寒性对预测其扩散机会和治理都具有重要意义。自中国大陆发现红火蚁后(曾玲等, 2005)，出现不少关于红火蚁在中国大陆的潜在分布区预测的报道(薛大勇等, 2005;陈晨等, 2006;杜予州等, 2007;沈文君等, 2008)，但仍缺乏对中国大陆红火蚁自然种群适生能力的研究。鉴于此，本文以中国大陆红火蚁主要发生区广东省的自然种群为研究对象，综合评价其耐寒性，为今后进一步评估其向北扩散的风险分析获取直接证据。

1　材料和方法

1.1　试虫来源

红火蚁种群于 2006 年 8 - 10 月采集于深圳发生区，用保鲜盒密封好，当天带回隔离实验室放入塑料盒中，塑料盒四壁涂以氟隆以防逃逸，用黄粉虫及糖水饲养，每次采样 10 个蚁巢，一周内测试完毕。选择健康的虫体进行过冷却点及抗寒性实验。

用于过冷却点季节性变动测定的红火蚁工蚁于 2005 年 10 - 2006 年 3 月每月中旬采自深圳。

1.2　过冷却点的测定

采用热电偶方法进行过冷却点的测定，所用仪器为过冷却点仪(江苏森意经济发展有限公司)，测定时将单头待测虫体放入一次性塑料枪头中，用热敏探头与之接触，后用隔热的材料包起来再放入一个低温箱(-30 ± 1℃)中进行测定。当体内自发的结冰发生时，由于潜热的释放使记录仪所记录的曲线上有一个较大的回折，根据回折点读出不同虫体的过冷却点值，其准确的值可以从电脑上读出。一个处理完成后用冰水混合物校正记录仪。重复 20 次以上。

1.3　低温存活实验

工蚁耐低温能力的测定方法：低温处理前，将健康的 30 头工蚁装于 10 mL 的试管中，用橡胶塞塞紧并用 Parafilm 膜封紧管口，在数控精密恒温循环水浴锅箱内进行低温实验。待温度达到所设定的温度时，将装有供试工蚁的试管平躺沉入水底，1 min后开始记时。处理结束后取出试管，擦净外面水珠，在室温下部分旋开瓶盖透气，让工蚁苏醒。约 10 min 后统计工蚁的存活情况。若无活动或四肢无抖动判定为工蚁死亡。测试温度用热敏探

头进行校正。重复 5 次。

1.4 低温处理 4 h 内的存活率

每根试管中放入 30 头健康的工蚁，在预设温度条件下处理。设 10 个温度梯度处理，分别为 –4，–5，–6，–7，–8，–9，–10，–11，–12，–13 和 –14℃。分别处理 0.5，1，2 和 4 h 后，将试管取出，室温下 10 min 后记录工蚁存活情况，每个处理 5 个重复。

1.5 低温处理不同时间工蚁的存活率

每根试管中放入 30 头健康的工蚁，在 –10 和 –11℃下处理 15，30，60，90，120 和 240 min。将试管取出，室温下 10 min 后记录工蚁存活情况，每个处理 5 个重复。

1.6 不同变幅持续低温工蚁的存活测定

将 30 头健康工蚁置于试管中，用胶塞封住试管防止工蚁逃出。将试管放入变幅分别为 0，3，6 和 9℃不同处理的气候箱内，每天随机取出 5 个试管的工蚁，10 min 后观察存活情况并记录，判定存活的方法同前。而驯化效果实验则是在处理 4 d 后各取出存活的工蚁，每试管分装 30 头工蚁，在 –9℃处理 2 h 后检查存活率，以室温为对照，重复 5 次。实验中，在各处理温度中工蚁处于晕迷或静止状态，所以不需要提供食物。

1.7 统计方法

存活率和暴露低温（T）之间的关系用逻辑斯谛方程进行模拟。方程形式是：

$$\hat{S}_T = \frac{100}{1 + e^{(a+bT)}}$$

其中，$\hat{S}_T$ 是在温度 T 时死亡率的估计。

存活率和低温暴露时间（t）之间的关系用逻辑斯谛方程进行模拟。方程形式是：

$$\hat{S}t = \frac{100}{1 + e^{(a+bt)}}$$

其中，$\hat{S}t$ 是在时间 t 时存活率的估计；a，b 为常数。

$Ltime_{50}$ 和 $Ltime_{90}$ 指的是导致个体 50% 或 90% 死亡所需的时间；$Ltemp_{50}$ 和 $Ltemp_{90}$ 指的是导致个体 50% 或 90% 死亡时的温度。

由 SPSS14.0 及 EXCEL 进行数据分析。所有数据以平均数 ± 标准误（mean ± SE）表示。

2 结果与分析

2.1 红火蚁种群中不同品级或虫态过冷却点均值比较

测定结果表明红火蚁各品级及其 3 个虫态（不包括卵）的过冷却点之间存在显著差异（F = 93.73，df = 6，217，P = 0.000）（表 1）。不同虫态过冷却点大小依次为蛹 < 成虫 < 幼虫。红火蚁成虫阶段的不同品级之间的过冷却点无显著性差异，而在蛹期及幼虫期，工蚁幼体的过冷却点要低于生殖蚁幼体，其中又以工蚁蛹的过冷却点最低，达到 –19.99℃，而生殖蚁幼虫的过冷却点仅为 –5.74℃，相差 14.25℃。用频次分布图表示红火蚁不同品级及其虫态的过冷却点值（图 1），可以明显看出，正态曲线的中心从 –20℃ 左右逐渐向 –6℃左右迁移，即从工蚁蛹至生殖蚁幼虫，过冷却点逐渐升高。

表 1 红火蚁种群中不同品级或虫态过冷却点均值比较

Table 1 Comparison of super cooling points of different castes/developmental stages in the *Solenopsis invicta* colony

品级或虫态 Caste or stage	SCP 平均值（℃） Means of SCP	冰点均值（℃） Means of freezing point
工蚁蛹 Worker pupa	–19.99 ± 0.67 a	–16.12 ± 0.15 a
生殖蚁蛹 Sexual pupa	–14.55 ± 0.75 b	–8.77 ± 0.30 b
雄生殖蚁 Alate male	–10.97 ± 0.44 c	–7.77 ± 0.33 bc
工蚁 Worker	–9.74 ± 0.31 cd	–6.91 ± 0.57 cd
雌生殖蚁 Alate female	–9.24 ± 0.52 d	–5.68 ± 0.33 de
工蚁幼虫 Worker larva	–7.58 ± 0.35 e	–4.95 ± 0.30 e
生殖蚁幼虫 Sexual larva	–5.74 ± 0.21 f	–2.45 ± 0.80 f

表中同列数字后带有相同字母的表示经方差（Duncan）分析，在0.05 水平上差异不显著；表 2 同。Means in the same column followed by the same small letters are not significantly different (DMRT) at the level of 0.05; the same for Table 2.

2.2 越冬条件下红火蚁工蚁过冷却点的变动

2005 年 10 月 –2006 年 3 月红火蚁种群过冷却点测定结果见表 2。越冬期间各月份红火蚁工蚁的过冷却点差异显著（F = 3.251，df = 5，185，P = 0.0077）。从 10 月份开始红火蚁野外种群的过冷却点开始下降，在 2 月份达到最低，为 –12.68℃，3 月份回升到 –9.51℃。在冬季各月份（12 –2 月）工蚁的过冷却点差异不显著，而处于正冬时期的工蚁与冬前和冬后相比过冷却点较低。将每月所测的过冷却点值进行频次分析，从频次分布图中的正态曲线中心轴可以发现，红火蚁工蚁的过冷却点从 10 月开始逐渐降低，至 2 月达到最低，而到 3 月迅速降低，正态曲线中心轴也呈现先左移再右移的趋势，从频次图上可见，红火蚁过冷却点以单峰型为主，而在 11 月和 2 月出现小峰现象，可能与其耐寒性调节与适应有关系（图 2）。

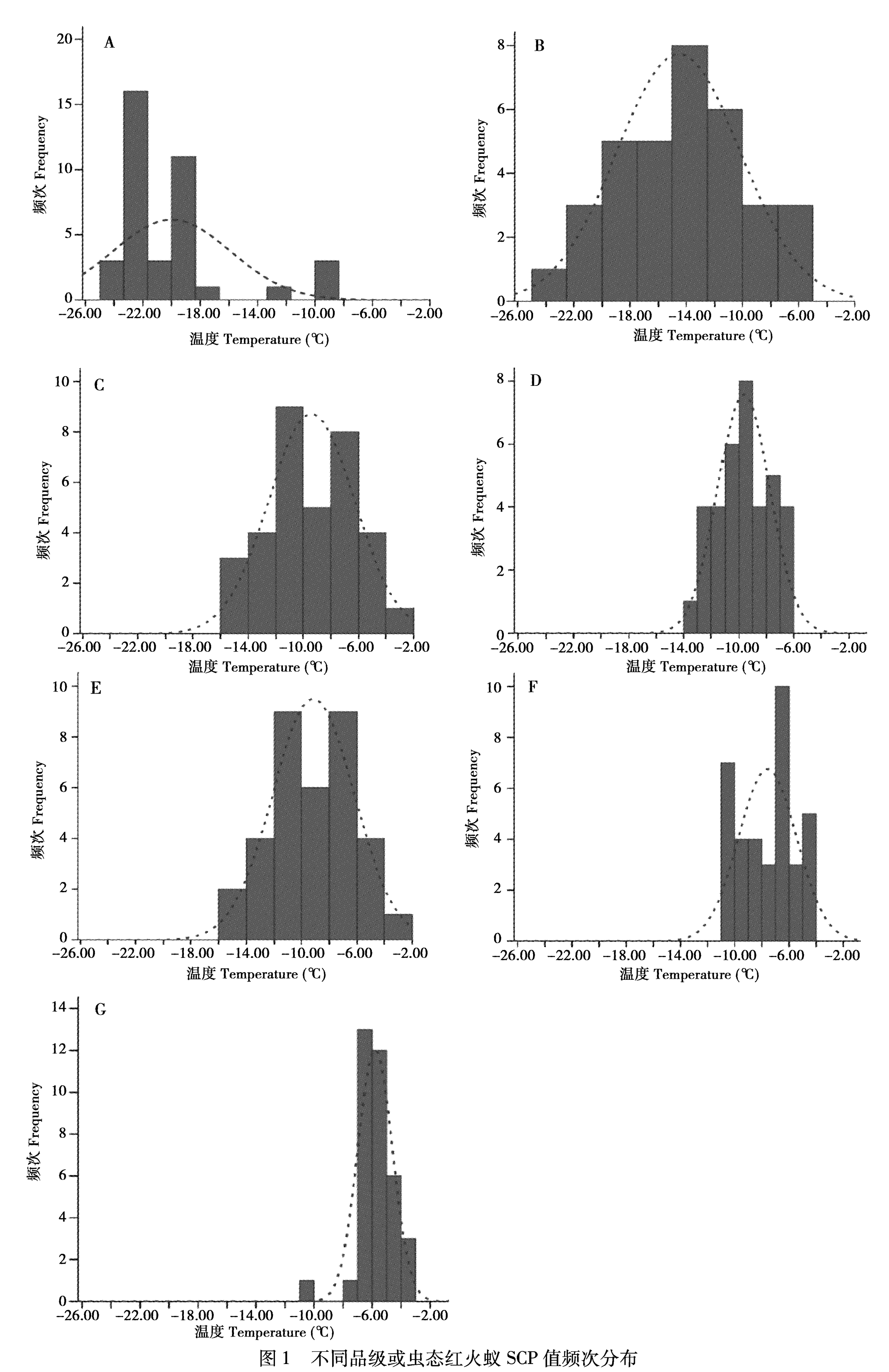


图 1　不同品级或虫态红火蚁 SCP 值频次分布

Fig. 1　SCP frequency distribution of different castes/developmental stages of *Solenopsis invicta*

A：工蚁蛹 Worker pupa；B：生殖蚁蛹 Sexual pupa；C：雄生殖蚁 Alate male；D：工蚁 Worker；E：雌生殖蚁 Alate female；F：工蚁幼虫 Worker larva；G：生殖蚁幼虫 Sexual larva.

表 2 红火蚁工蚁越冬期间过冷却能力比较

Table 2 Comparison of super cooling ability of *Solenopsis invicta* workers during over-wintering period

月份 Month	SCP (℃)	SCP 最高值 (℃) SCP maximum	SCP 最低值 (℃) SCP minimum
10 月 October	−9.74 ±0.31 c	−6.5	−13.4
11 月 November	−10.60 ±0.89 bc	−3.1	−20.6
12 月 December	−10.98 ±0.76 abc	−4.1	−20.5
1 月 January	−11.81 ±0.78 ab	−5.4	−20.9
2 月 February	−12.68 ±0.77 a	−7	−22.6
3 月 March	−9.51 ±0.40 c	−3.9	−14.2

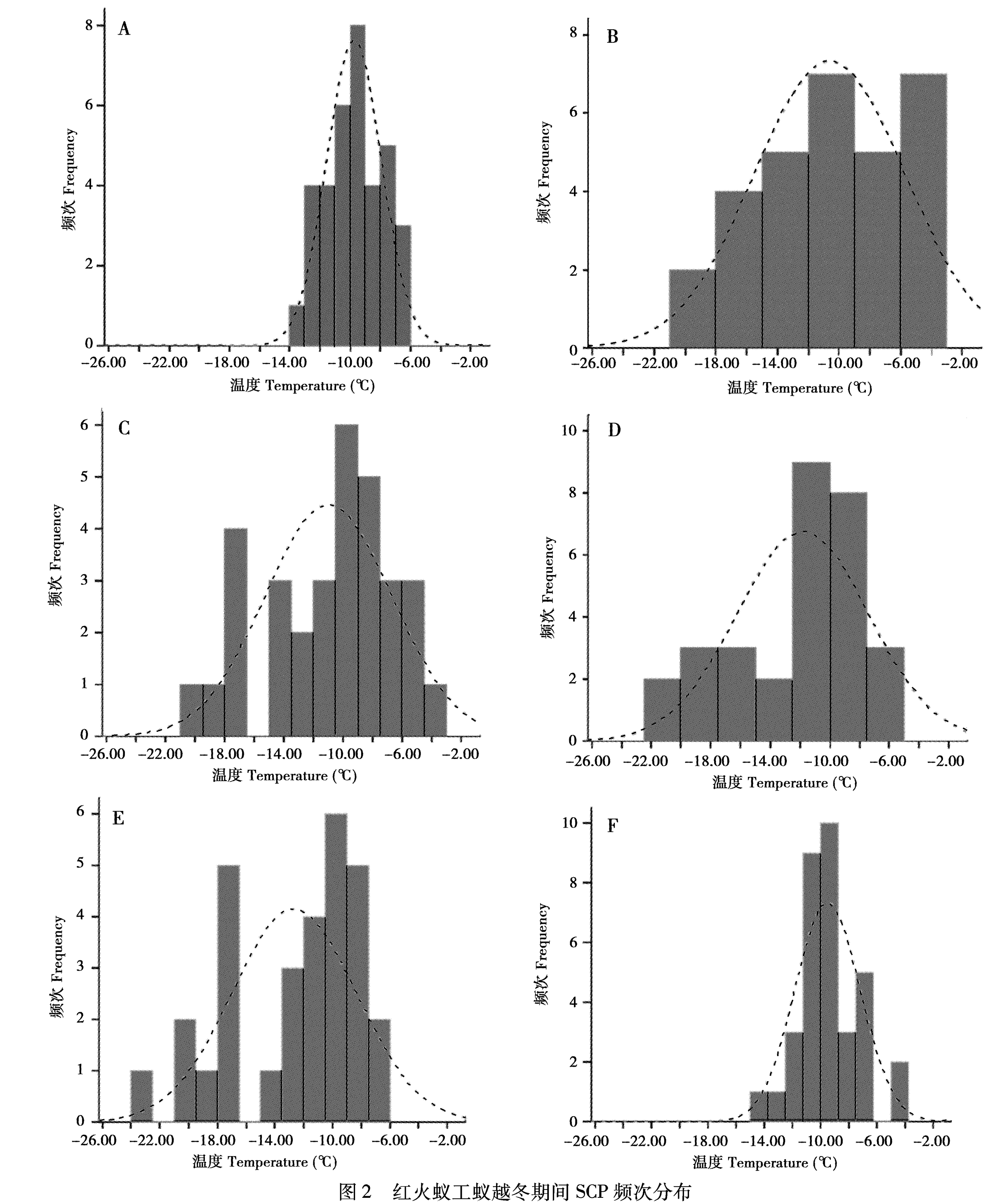


图 2 红火蚁工蚁越冬期间 SCP 频次分布

Fig. 2 SCP frequency distribution of *Solenopsis invicta* workers during over-wintering period

A: 10 月 October; B: 11 月 November; C: 12 月 December; D: 1 月 January; E: 2 月 February; F: 3 月 March.

2.3　低温胁迫对红火蚁工蚁存活的影响

红火蚁低温下的存活率 $\hat{S}_T$ 和暴露温度 T 之间的关系符合逻辑斯谛方程（$\hat{S}_T = 100/(1 + a \times \exp(-b \times T))$）（$P < 0.001$）（图 3）。从结果可以看出，在相同的处理时间内，红火蚁工蚁随着暴露温度的降低，死亡速率增大。当处理时间为 0.5 h，红火蚁工蚁在 −14℃存活率为 15.3%；当处理时间为 1，2 和 4 h，分别需要在 −13、−9 和 −9℃才可使工蚁全部致死。

红火蚁工蚁低温下的存活率 $\hat{S}t$ 和暴露时间 t 之间的关系符合逻辑斯谛方程 $\hat{S}t = 100/[1 + a \times \exp(-b \times t)]$（$P < 0.001$）。结果（图 4）表明，当处理温度为 −10℃，需要经过 240 min 红火蚁工蚁才全部死亡，在 −11℃，需要 120 min。

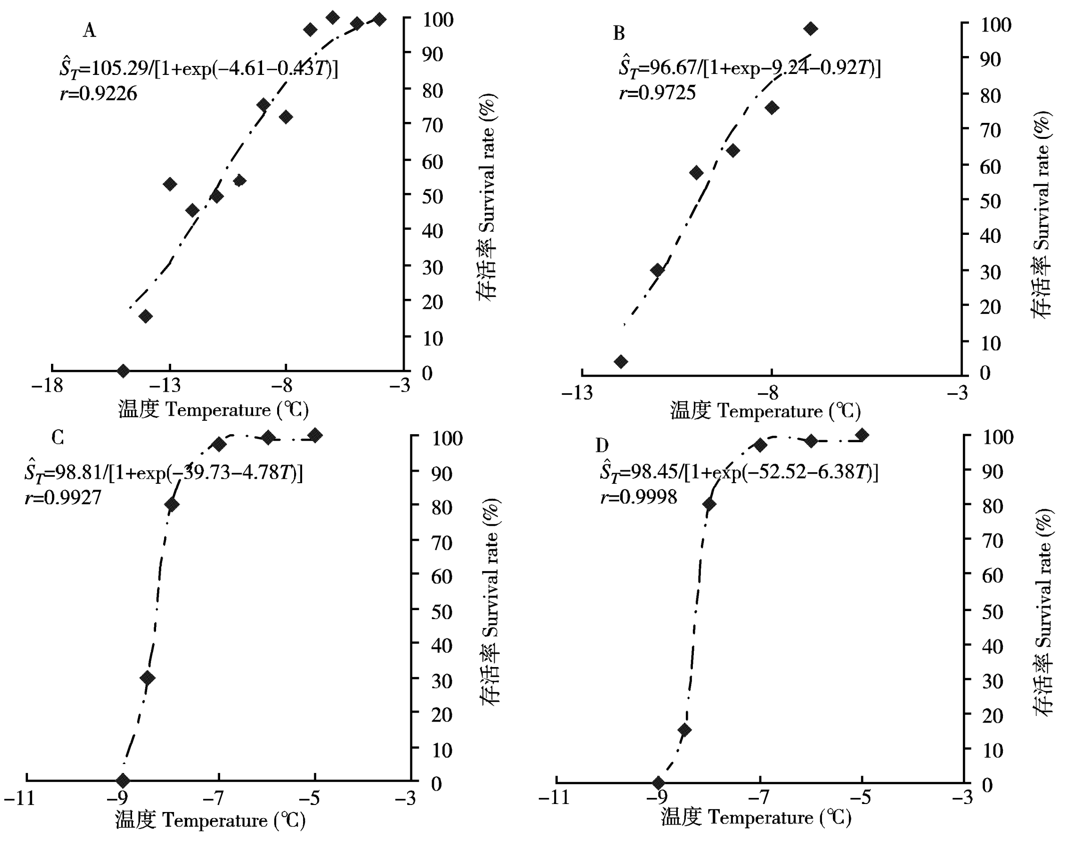


图 3　红火蚁工蚁不同低温暴露时间后存活率

Fig. 3　The survival rate of *Solenopsi invicta* workers exposed to low temperatures with different exposure time

A：0.5 h；B：1 h；C：2 h；D：4 h. 图中方点表示实测值，虚线表示逻辑斯谛曲线模型；图 4 同。Square point in the figure is the measured value, while dotted lines indicate the logistic curve model; the same for Fig. 4.

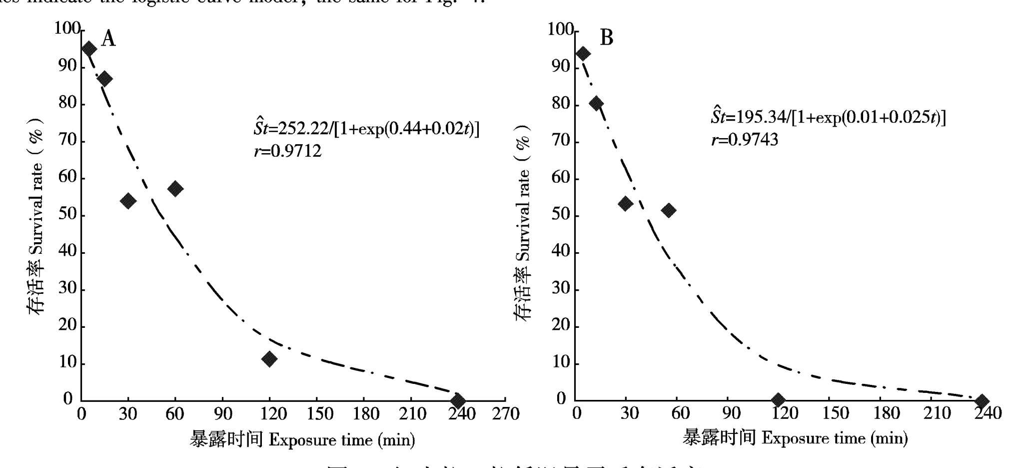


图 4　红火蚁工蚁低温暴露后存活率

Fig. 4　The survival rate of *Solenopsi invicta* workers exposed to low temperatures

A：10℃；B：11℃.

实验结果表明了红火蚁工蚁在低温暴露0.5 h条件下 $Ltemp_{50}$ 和 $Ltemp_{90}$ 分别为 -11.13 和 -16.22℃，相差5.09℃（表3），说明当暴露时间为0.5 h，-11 ~ -16.5℃是红火蚁工蚁的致死敏感高温区。同样，当暴露时间为4 h时，红火蚁工蚁的致死敏感高温区为 -7.5 ~ -9℃。

表3 两种火蚁工蚁的致死温度(Ltemp)

Table 3 $Ltemp_{50}$ and $Ltemp_{90}$ of the fire ant workers

暴露时间 (h) Exposure time	$Ltemp_{50}$ (℃)	$Ltemp_{90}$ (℃)
0.5	-11.13	-16.22
1.0	-9.93	-12.35
2.0	-8.31	-8.77
4.0	-7.55	-8.57

从表4可以看出，当红火蚁工蚁暴露于 -10℃的的低温时，$Ltime_{50}$ 和 $Ltime_{90}$ 分别为52.09和149.40 min；而当暴露于 -11℃的的低温时，$Ltime_{50}$ 和 $Ltime_{90}$ 分别为43.02和118.31 min。

表4 两种火蚁工蚁的致死时间(Ltime)

Table 4 $Ltime_{50}$ and $Ltime_{90}$ of the fire ant workers

暴露温度 (℃) Exposure temperature	$Ltime_{50}$ (min)	$Ltime_{90}$ (min)
-10	52.09	149.40
-11	43.02	118.31

2.4 低温条件下红火蚁对不同温度变幅的调节能力

连续的不同变幅条件下的低温处理见图5，处理的平均低温为4℃，变幅分别为0，3，6和9℃，温度变化速率固定，并作24 h的循环以期对自然变温的简单模拟，即每天以固定的变温速度，最高温度经过12 h降至最低，再经过12 h回升至最高完成一个循环并以此持续处理，以常温作为对照。

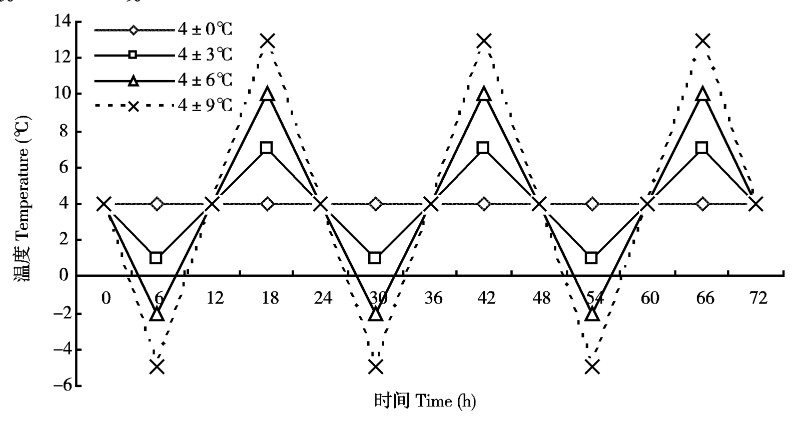


图5 不同变幅条件下温度循环示意图

Fig. 5 Daily cycle of different amplitudes for mean temperature of 4℃

实验结果表明：不同变幅的持续作用对红火蚁工蚁的存活率有较大的影响。总体来说，经过相同的处理时间，变幅越大工蚁存活率越低。在处理后2 d，4±0℃、4±3℃和4±6℃条件下的工蚁存活率分别为98.67%，99.33%和93%，而4±9℃处理的工蚁存活率已降为75.33%；处理后4 d，在4±0℃，4±3℃，4±6℃和4±9℃处理条件下的存活率分别为84%，88%，60%和36%。另外，存活率降至0所需要经历的时间长度也不同，4±9℃处理时在处理9 d即降为0，而4±0℃处理则要长于15 d(图6)。

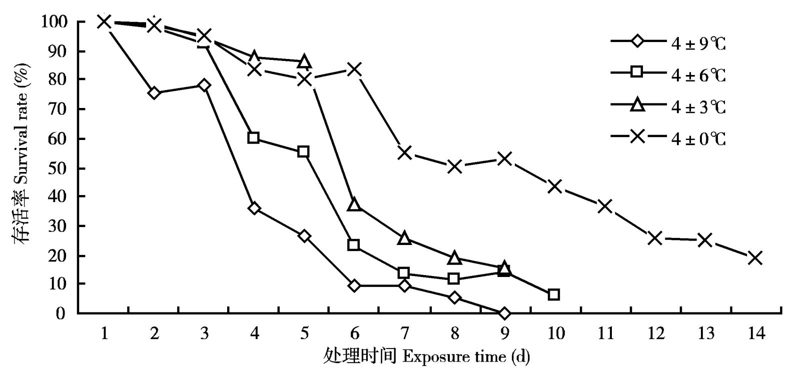


图6 不同变幅低温持续作用下对红火蚁的存活情况

Fig. 6 Survivorship of *Solenopsi invicta* workers under different fluctuating low temperatures

不同变幅的持续低温作用对红火蚁工蚁的抗寒能力有着驯化作用，从图 7 可见，不同变幅低温处理 4 d 后在 -9℃ 的存活率存在差异（$F = 30.767$, $P = 0.000$）。结果表明，与对照相比，4 ±6℃和 4 ±9℃处理 4 d 能提高工蚁在低温下的存活率，而 4 ±0℃和 4 ±3℃处理后抗寒能力与对照的差异则没有达到显著水平。

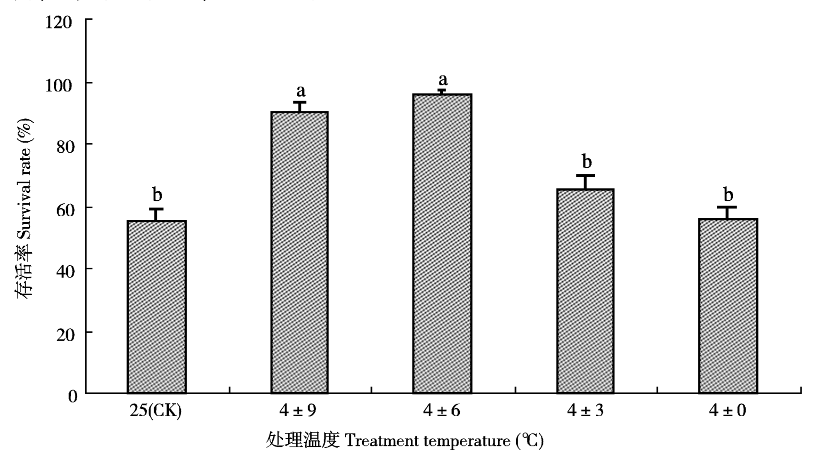


图 7　连续和不同变幅的低温（4℃）处理 4 d 后对红火蚁抗寒能力的驯化

Fig. 7　Cold hardening of *Solenopsi invicta* workers after constant and fluctuating low temperature (4℃) treatments for 4 d

图中柱上字母相同者表示经方差分析（DMRT），在 5% 水平上差异不显著。Bars followed by the same letter are not significantly different (DMRT) at the level of 0. 05.

3　讨论

关于入侵种的研究已经越来越受到人们的重视，因为这些入侵种存在着潜在的负面作用，比如它们会导致本地物种的流失（Vanderwoude *et al.*, 2000）及阻碍生态进化（Woodward and Hildrew, 2001）。非生物条件可以影响入侵种的驻居与蔓延，研究这些条件的影响有助于更好地了解入侵种的生理学和容忍能力，也可帮助我们识别哪些地区适合集中控制和根本杜绝入侵种（Weber, 2001）。

关于红火蚁过冷却点的报道有很多，研究结果也存在差异，但所有的文献报道（包括我们的研究结果）认为红火蚁的过冷却点都是低于 -6℃，并且大部分是介于 -9℃和 -20℃之间（Francke *et al.*, 1986; Taber *et al.*, 1987; Diffie and Sheppard, 1989; Landry and Phillips, 1996; James *et al.*, 2002; Quarles *et al.*, 2005）。红火蚁是土栖性生物，其蚁巢结构复杂，工蚁对温度具有很高的敏感性，会有在蚁巢内不断移动以获取自身和幼体发育所需要的热量（Porter and Tschinkel, 1993; Tschinkel, 2005）。在寒冷的季节红火蚁会向蚁丘深处撤退，而蚁丘则像个热的“绝缘体”，在红火蚁出现最寒冷的地方蚁丘顶部的温度为 -2～-4℃（Porter and Tschinkel, 1987; Vogt *et al.*, 2002）。

比较了红火蚁不同虫态之间的过冷点差异，结果表明红火蚁 3 个虫态（不包括卵）的过冷却点存在显著差异（$F = 93.73$, $P = 0.000$）。不同虫态过冷却点大小依次为蛹 < 成虫 < 幼虫。红火蚁成虫阶段的不同品级之间的过冷却点无显著性差异，而在蛹期及幼虫期，工蚁幼体的过冷却点要低于生殖蚁幼体。造成这种差异的主要原因是不同虫态之间的营养结构、体内化学物质组成等生理条件的不同（Worland *et al.*, 2006）。另外，实验结果表明红火蚁野外种群在越冬前后存在过冷却点波动的情况。在冬季各月份（12 -2 月）工蚁的过冷却点差异不显著，而处于冬季时期的工蚁与冬前、后相比过冷却点较低，并存在显著差异。这种现象说明红火蚁在经历冬季低温时抗寒能力会有暂时性的调整。

人们一直以来都在寻找限制一个物种地理分布的因素，一般认为高纬度地区冬季低温是限制物种分布的关键因子（Case and Tarper, 2000; Gaston, 2003）。因此，温度胁迫是种群适应性反应的进化动力，会导致物种分化甚至新物种的形成（Sørensen and Loeschcke, 2001）。已经知道与物种形成和发育热能需求相关的生活史对策与种群的地理起源有关（Honěk, 1996; Masaki, 1996）。同样，研究认为热适应的种群间差异是可遗传特征之一，代表了生物体通过进化途径或自然选择对环境的适应（Masaki, 1996; Tanaka, 1999; Sørensen and

Loeschcke, 2001)。生物基于对温度胁迫(结合其他气候的因子)适应出现地理种群的分化和种群的季节分化。美洲斑潜蝇 *Liriomyza sativae* 和南美斑潜蝇 *Liriomyza huidobrensis* 同为起源于南美洲的新大陆种,但在生境适应过程中种群优势关系产生地域性和季节性分化:南美斑潜蝇在温和或冷凉地区种群数量明显增多,在许多地区或寄主上有逐步取代美洲斑潜蝇的趋势(陈兵和康乐,2005)。而红火蚁入侵中国大陆后是否具有比热带火蚁或其他本地蚂蚁更强的耐寒性以帮助其向北的扩散有待进一步比较研究。

自然条件下生物体的冻害程度主要受极端最低气温、低温持续时间和气温变幅 3 个因素影响。本研究根据广东省冬季低温特点进行低温模拟实验,测定了降温强度(温度变幅)、低温持续时间、循环次数对红火蚁的影响,旨在更深入了解广东常规的冬季气候是否能对红火蚁耐寒性产生驯化效应。结果发现在变幅比较剧烈的低温下,红火蚁的工蚁表现出较高的死亡率,但幸存者则表现出了更强的耐低温的能力,说明红火蚁面对极端的气候条件具有较强的生态适应能力,也证明相对恶劣的条件对红火蚁工蚁有着明显的驯化作用。因此,南方的红火蚁种群在经历冬季周期性低温作用后可能会获得更强的耐寒性,而这点对其北扩将有重要意义。与广东冬季的自然气候相比,本研究中温度变幅的设置相对理想和简单,实际情况不会是均匀变化而是冷暖气候阶段性交替出现,以冷天持续相对较短和暖天较长的变化特征,这种气候变化对红火蚁的冷驯化是否促进也是值的关注的一个问题。

参 考 文 献 (References)

Anonymous, 1972. Ecological range for the imported fire ant-based on plant hardiness. *Cooperative Economic Insect Report*, 22 (7): centerfold map.

Case TJ, Tarper ML, 2000. Interspecific competition, environmental gradients, gene floe, and the coevolution of species' borders. *American Naturalist*, 155: 583 – 605.

Chen B, Kang L, 2005. Adaptation and population distribution of insect under the environmental thermal stress. *Progress in Natural Science*, 3: 265 – 270. [陈兵, 康乐, 2005. 昆虫对环境温度胁迫的适应与种群分化. 自然科学进展, 3: 265 – 270]

Chen C, Gong WR, Hu BS, Zhou GL, Bao YX, Liu FQ, 2006. Potential establishment areas of *Solenopsis invicta* in China: a prediction based on GIS. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 17 (11): 2 093 – 2 097. [陈晨, 龚伟荣, 胡白石, 周国梁, 包云轩, 刘凤权, 2006. 基于地理信息系统的红火蚁在中国适生区的预测. 应用生态学报, 17(11): 2 093 – 2 097]

Diffie SK, Sheppard DC, 1989. Supercooling studies on the imported fire ants: *Solenopsis invicta* and *Solenopsis richteri* (Hymenoptera: Formicidae) and their hybrid. *Journal of Entomological Science*, 24: 361 – 364.

Du YZ, Gu J, Guo JB, Dai L, Ju RT, Hu XN, 2007. Study on the potential distribution area of invasive alien pest red imported fire ant, *Solenopsis invicta* Buren in China. *Scientia Agricultura Sinica*, 40 (1): 99 – 106. [杜予州, 顾杰, 郭建波等, 2007. 入侵害虫红火蚁在中国的适生性分布研究. 中国农业科学, 40 (1): 99 – 106]

Francke OF, Cokendolpher JC, Potts LR, 1986. Supercooling studies on North American fire ants (Hymenoptera: Formicidae). *Southwest Naturalist*, 31: 87 – 94.

Gaston KJ, 2003. The Structure and Dynamics of Geographic Ranges. Oxford University Press, New York.

Gibert P, Petavy G, Karan D, David JR, Moretean B, 2001. Chill-coma tolerance, a major climatic adaptation among *Drosophila* species. *Evolution*, 55: 1 063 – 1 068.

Hahn DA, Martin AR, Porter SD, 2008. Body size, but not cooling rate affects supercooling points in the red imported fire ant *Solenopsis invicta*. *Environmental Entomology*, 37(5): 1 – 7.

Hoffmann AA, Sørensen JG, Loeschcke V, 2003. Adaptation of *Drosophila* to temperature extremes: Bringing together quantitative and molecular approaches. *Journal of Thermal Biology*, 28 (3): 175 – 217.

Honěk A, 1996. Geographical variation in thermal requirements for insect development. *European Journal of Entomology*, 93: 303 – 312.

James SS, Pereira RM, Vail KM, Ownley BH, 2002. Survival of imported fire ant (Hymenoptera: Formicidae) species subjected to freezing and near-freezing temperatures. *Environmental Entomology*, 31: 127 – 133.

Killion MJ, Grant WE, Vinson SB, 1995. Response of *Baiomys taylori* to changes in density of imported fire ants. *Journal of Mammalogy*, 76: 141 – 147.

Korzukhin MD, Porter SD, Thompson LC, Wiley S, 2001. Modeling temperature-dependent range limits for the fire ant *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) in the United States. *Environmental Entomology*, 30: 645 – 655.

Landry CE, Phillips SAJ, 1996. Potential of icenucleating active bacteria for management of the red imported fire ant (Hymenoptera: Formicidae). *Environmental Entomology*, 25: 859 – 866.

Masaki S, 1996. Geographical variation of life-cycle in crickets (Ensifera: Grylloidea). *European Journal of Entomology*, 93: 281 – 302.

Morrison LW, Porter SD, Daniels E, Korzukhin MD, 2004. Potential global range expansion of the invasive fire ant, *Solenopsis invicta*. *Biological Invasions*, 6: 183 – 191.

Porter SD, Tschinkel WR, 1987. Foraging in *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae): Effects of weather and season. *Environmental Entomology*, 16: 802 – 808.

Porter SD, Tschinkel WR, 1993. Fire ant thermal preferences: Behavioral control of growth and metabolism. *Behavioral Ecology of Sociobiology*, 32: 321 –329.

Quarles A, Kostecke RM, Phillips SA, 2005. Supercooling of the red imported fire ant (Hymenoptera: Formicidae) on a latitudinal temperature gradient in Texas. *Southwest Naturalist*, 50: 302 –306.

Sørensen JG, Loeschcke V, 2001. Larval crowding in *Drosophila melanogaster* induces Hsp70 expression, and leads to increased adult longevity and adult thermal stress resistance. *Journal of Insect Physiology*, 47: 1 301 –1 307.

Shannon SJ, Roberto MP, Karen MV, Bonnie HO, 2002. Survival of imported fire ant (Hymenoptera: Formicidae) species subjected to freezing and near-freezing temperatures. *Environmental Entomology*, 31: 127 –133.

Shen WJ, Wang YN, Wan FH, 2008. Application of analogy deviation to predict potential distribution of *Solenopsis invicta* Buren (Hymenoptera: Formicidae) and its invasion probability in China. *Scientia Agricultura Sinica*, 41(6): 1 673 –1 683. [沈文君, 王雅男, 万方浩, 2008. 应用相似离度法预测红火蚁在中国适生区域及其入侵概率. 中国农业科学, 41(6): 1 673 –1 683]

Taber SW, Cokendolpher JC, Francke OF, 1987. Supercooling points of red imported fire ants, *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) from Lubbock. *Texas Entomology News*, 98: 153 –158.

Tanaka K, 1999. Cold tolerance in the house spider, *Achaearanea tepidariorum* (Araneae: Theridiidae). *Entomological Science*, 2: 597 –604.

Tschinkel WR, 2005. The Fire Ants. Harvard University Press, Cambridge, MA.

Vanderwoude C, Lobry De Bruyn LA, House APN, 2000. Response of an open-forest ant community to invasion by the introduced ant, *Pheidole megacephala*. *Austral Ecology*, 25: 253 –259.

Vinson SB, 1997. Invasion of the red imported fire ant (Hymenoptera: Formicidae): Spread, biology, and impact. *American Entomology*, 43: 23 –39.

Vogt JT, Smith WA, Grantham RA, Wright RE, 2002. Effects of temperature and season on foraging activity of red imported fire ants (Hymenoptera: Formicidae) in Oklahoma. *Environmental Entomology*, 32: 447 –451.

Weber E, 2001. Current and potential ranges of three exotic goldenrods (*Solidago*) in Europe. *Conservative Biology*, 15: 122 –128.

Woodward G, Hildrew AG, 2001. Invasion of a stream food web by a new top predator. *Journal of Animal Ecology*, 70: 273 –288.

Worland MR, Leinaas HP, Chown SL, 2006. Supercooling point frequency distributions in Collembola are affected by moulting. *Functional Ecology*, 20: 323 –329.

Xue DY, Li HM, Han HX, Zhang RZ, 2005. A prediction of potential distribution area of *Solenopsis invicta* in China. *Entomological Knowledge*, 42(1): 57 –59. [薛大勇, 李红梅, 韩红香, 张润志, 2005. 红火蚁在中国的分布区预测. 昆虫知识, 42(1): 57 –59]

Zeng L, Lu YY, He XF, Zhang WQ, Liang GW, 2005. Identification of red imported fire ant *Solenopsis invicta* Buren to invade mainland China and infestation in Wuchuan, Guangdong, China. *Entomological Knowledge*, 42(2): 44 –48. [曾玲, 陆永跃, 何晓芳, 张维球, 梁广文, 2005. 入侵中国大陆的红火蚁的鉴定及发生为害调查. 昆虫知识, 42(2): 44 –48]

（责任编辑：袁德成）